

Simulation and Improvement of Bus Rollover Crash Performance With Finite Element Method

Qi Wenguo¹, Dong Xiaokun¹, Wei Jianhua¹, Wei Yongqiang¹, Fan Zijie²

(1. Zhengzhou Yutong Bus Co., LTD, Zhengzhou, 450016, China; 2. Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract: Based on the basic theory of vehicle crash analysis using the nonlinear finite element method, a finite element model of a passenger bus is built in detail. A dynamic rollover crash analysis of the bus is performed successfully according to the European regulation ECE R66. The deformation of superstructure and intrusion of the passenger residual space is investigated. The good coherence between the simulation result and the theory result in energy indicates that the finite element model is valid and accurate. Based on the simulation result, some design improvements and reinforcements of roof horizontal beams and window pillars are achieved. The capability of preventing the bending deformation is enhanced, and the bus rollover crash is improved greatly. Research result is a guide to realize the optimum design of the crashworthiness for bus rollover crash.

Keywords: rollover, crash, residual space, finite element method, simulation

客车侧翻碰撞安全性能的有限元仿真和改进

齐文果¹, 董晓坤¹, 魏建华¹, 魏永强¹, 范子杰²

(1. 郑州宇通客车股份有限公司, 郑州 450016; 2. 清华大学汽车工程系, 北京 100084)

摘要: 基于非线性有限元方法进行碰撞仿真的原理, 针对某型号客车详细阐述了整车有限元模型的建立, 依据欧洲 ECE R66 法规要求进行了客车动态翻滚碰撞过程的仿真研究, 评价了该车的上部结构以及乘员生存空间是否存在侵入, 仿真分析与理论分析的能量曲线取得了较好的一致, 说明该有限元模型是准确的。根据仿真计算结果, 对顶横梁、窗立柱等结构进行改进设计, 有效提高了其抵抗变形能力, 改善了该车的侧翻安全性能。研究结果对客车结构侧翻安全性的优化设计具有重要指导意义。

关键词: 侧翻, 碰撞, 生存空间, 有限元方法, 仿真

1 引言

当今和未来, 客车仍是人们出行和旅游最广泛采用的交通工具。2005 到 2010 年, 保守估计中国公路的客运总量将达到 1200 亿人次。客车交通事故的数量也呈上升趋势, 尤其国内“群死群伤”的翻车等事故时常发生, 造成了非常恶劣的社会影响。因此, 客车安全性日益受到人们重视。

从事故统计来看, 大客车翻车造成的“群死群伤”事故是最为严重的^[1]。根据美国公路交通安全局 (NHTSA) 的数据, 客车侧翻事故死亡率是前后碰撞事故死亡率的 6 倍^[2]。目前世界上许多国家都已把大客车的侧翻试验作为强制性的认证试验。我国国家标准也正拟增加对客车侧翻性能的强制要求。因此研究并提高客车侧翻碰撞的安全性尤为必要。

客车侧翻试验为破坏性试验, 需要花费大量的金钱和时间。采用有限元方法的汽车耐撞性分析自 20 世纪 80 年代以后得到了迅速的发展。现在, 国内对乘用车 (主要是轿车) 碰撞安全性进行了大量的研究, 取得了显著的成效^[3-4]。由于国内客车行业的技术发展和应用远落后于乘用车行业, 导致中国虽已成为世界客车的制造中心, 但是在客车的侧翻碰撞安全性技术和相关试验法规方面却未能构成体系, 导致国内采用模拟分析技术进行客车侧翻碰撞安全性能的研究几乎是空白。

本文建立了某型号大客车的有限元模型, 采用先进的数值模拟技术, 对客车多方位碰撞的安全性、翻车时顶盖的强度和刚度以及侧翻时保证乘员生存空间的车身结构等进行研究。研究结果对客车侧翻碰撞安全性能的优化设计具有重要的指导意义和应用价值。

2 标准与法规

目前客车侧翻性能的国际标准主要是欧盟的ECE R66《大型客车上部结构强度（附录5）》、ECE R107《关于批准双层大客车通用结构要求的统一规定》等^[5-6]。以上标准是欧洲客车业界多年讨论和研究工作的总结，M2 或者M3 类客车依据这些标准对客车整车进行型式认证。其中一项就是针对客车上部结构承受能力的考核，考核其发生倾翻后，上部车身的变形是否侵入乘客的生存空间。

其他国家的标准，比如澳大利亚国家标准 ADR59/00、南非国家标准 SANS 1563 以及我国的标准 GB17578，都是引用了 ECE R66 中的整车倾翻试验部分。在 ECE R66 中，提供了五种方法对客车倾翻时上部结构强度进行检验。这五种方法分别是①整车倾翻试验；②车体截段倾翻试验；③车体截段准静态负荷试验；④基于部件测试的准静态计算；⑤计算机模拟整车侧翻试验。

在上述五种方法中，第一种方法作为基本认证获得了广泛的应用，但其成本昂贵、周期较长。该方法简述如下：将客车在整备质量下，停放在一个水平的倾斜平台上，该平台与撞击面之间的高度差为 800mm，客车在没有摇晃和不受其他外力影响的情况下，随倾斜平台以不超过 $5^\circ/\text{s}$ 的角速度侧倾直到翻倒下来，通过安装在车身上的变形规和高速摄像机分别测量和纪录在翻倒前后车内生存空间的变化。如图 1 所示。

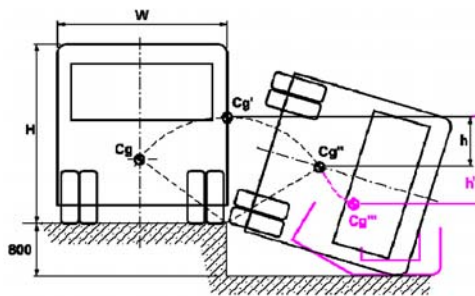


图 1 整车侧翻试验示意图

生存空间是客车上部结构按照上述的实验方法进行试验期间及完成试验后，为乘客提供更大生存可能的空间。图 2 (a) 是生存空间的垂直横截面(即有阴影部分)。S_R点是确定生存空间的基准点。该点位于座椅椅背上，距乘客脚下的地板 500mm，距车身内壁 150mm。

在车辆长度方向的乘客区内，按照上述的垂直横截面沿着S_R点的连线移动所扫过的空间就是生存空间。S_R点的连线是从最后一排座椅的S_R点，依次经过每排座椅的S_R点，直到最前排座椅S_R点的连线，如图 2 (b) 所示。

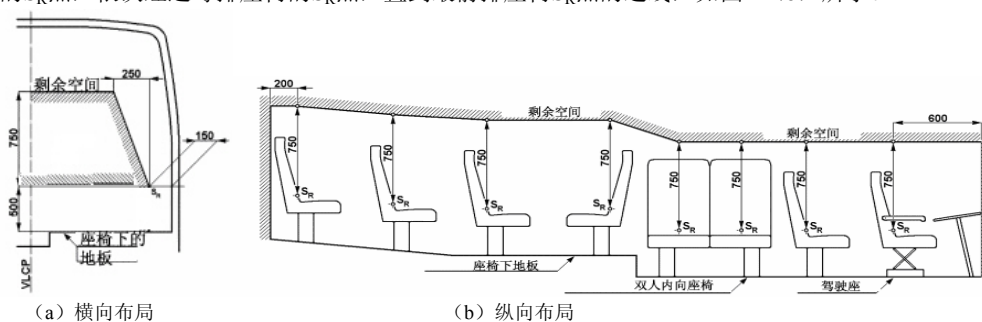


图 2 生存空间

3 客车侧翻碰撞仿真的有限元方法

客车侧翻碰撞是客车结构在剧烈碰撞动态载荷作用下极短时间内发生的复杂非线性过程。从力学角度而言，是一个同时包含几何非线性、材料非线性、边界非线性的复杂力学问题。对该类高度非线性问题，采用高效的算法是十分必要的，目前一般采用逐步积分法来求解，其中较成熟的方法是基于显式中心差分法的非线性有限元方法。该方法具有两大优点：①采用集中质量矩阵，运动方程是非耦合的，不需要组集成总体刚度矩阵，因此大大节省存储空间和求解机时。②显式方法不需要对刚度矩阵进行多次分解和迭代。

同一般的动力学问题相比，碰撞仿真除了受运动平衡方程、应力位移关系、应力应变关系及相应的初始条件和边界条件

的控制外，还要满足接触约束条件^[7]。根据虚位移原理，系统平衡方程为：

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \sigma \delta e d\Omega = \int_{\Omega} b \delta u d\Omega + \\ \int_{\Gamma_f} q \delta u dS - \int_{\Omega} \rho \ddot{u} \delta u dV + \int_{\Gamma_c} q_c \delta u dS \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Ω 是仿真模型的空间域， Γ_f 是给定边界力的边界， Γ_c 为接触边界， σ, b, q, q_c 分别表示柯西应力、体积力、边界力及接触力， δu 为虚位移， δe 为虚应变， ρ 为密度， $\ddot{u}$ 是加速度。在实际应用中，对整个汽车结构进行单元划分，经单元计算并组集后，由（1）式可建立下列矩阵方程：

$$M\ddot{u}^t = Q^t - R^t + F_c^t \quad (2)$$

式中 M 为质量矩阵， Q 为外载荷矢量， R 为内力矢量， F_c 为接触力矢量，上标 t 代表时刻 t 。

对于式（2），采用中心差分法，其关系表达式为：

$$\dot{u}^{t+(\Delta t/2)} = \dot{u}^{t-(\Delta t/2)} + \Delta t \cdot \ddot{u}^t \quad (3)$$

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \Delta t \cdot \dot{u}^{t+(\Delta t/2)} \quad (4)$$

联立（3）和（4）式，可以得到：

$$\ddot{u}^t = \frac{u^{t+\Delta t} - 2u^t + u^{t-\Delta t}}{(\Delta t)^2} \quad (5)$$

根据（2）和（5），可建立时间递推公式：

$$u^{t+\Delta t} = M^{-1}[(\Delta t)^2(Q^t - R^t + F_c^t) + 2Mu^t - Mu^{t-\Delta t}] \quad (6)$$

式中 $\dot{u}^{t+(\Delta t/2)}$ 、 $\dot{u}^{t-(\Delta t/2)}$ 分别是 $t+(\Delta t/2)$ 和 $t-(\Delta t/2)$ 时刻的节点速度矢量， $u^{t+\Delta t}$ 、 u^t 分别是 $t+\Delta t$ 和 t 时刻的节点位移矢量， Δt 是时间步长。

采用集总的方法将 M 对角化，式(6)解耦为一组互不关联的方程，这就免去了建立与求解联立方程组的工作，使计算变得简单、迅速。

4 面向侧翻安全性的整车有限元模型

本研究所用的客车整车有限元模型是在整车各个零部件的 CAD 模型进行单元离散化的基础上拼接而成的。主要包括车身骨架、底盘、车轮总成等，其他零部件，如发动机、变速箱、车桥、顶置空调、座椅、油箱等，均以等效配重的方式分布在对应几何位置的节点上，目的是为了保证有限元模型整车的重心与实车重心的偏差不超过 20mm。整个模型单元数量约为 704,000 个，节点数量为 708,000 个，整车有限元模型如图 3 所示。

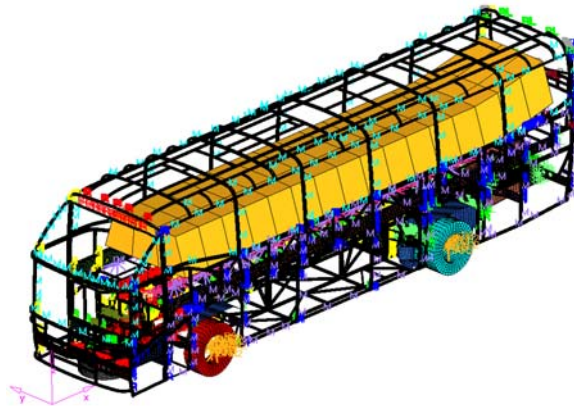


图 3 整车有限元模型

在碰撞仿真的大变形过程中,单元类型和大小对计算精度和效率有很大的影响。由于车身结构主要是薄壁型材,因此单元类型以带有沙漏控制的四边形壳单元为主,对四边形单元形状如长宽比、翘曲度、最大角、最小角等都做出了严格的规定。由于三角形单元比四边形单元的刚度大,会影响计算精度,所以要尽量控制使用三角形单元。参照国际大型汽车企业有限元网格划分的规则,限定单元长宽比不大于5;翘曲度尽量控制在 20° 以内($\leq 15\%$)且防止出现翘曲单元集中的区域;四边形单元各角度控制在 45° - 135° 之间,三角形单元各角度控制在 20° - 120° 之间。

为更详细描述车身构件的几何形状和连接性质,模型中还包括梁单元、杆单元、六面体单元、弹簧单元及刚性单元等。在网格划分过程中要合理布置单元的分布:对于碰撞接触区及大变形区进行网格合理细化;对于变形较小或几乎不变形的区域,网格分布可以合理稀疏、甚至作为刚体处理,从而尽可能高地保证精度和效率的平衡。考虑到骨架型钢的联接主要是缝焊联接,侧翻碰撞中开裂的几率很小。因此建模时,在需要联接的两个节点之间加入无质量的刚性单元来模拟。

由于客车车身在撞地瞬间碰撞过程内,结构褶曲的局部变形很大,其应变率也较大,因此定义的材料模型必须考虑材料应变率效率对仿真产生的影响。车身骨架主要是厚度 1.0 mm ~ 3.0 mm 的低碳钢,以Cowper-Symonds应变率模型考虑其影响。而对于发动机、车桥等,则采用刚性材料处理。

实践证明,接触界面的处理是碰撞类强非线性问题求解中最重要也是最耗时的一个环节。在侧翻碰撞模拟分析中,为防止不同部件之间相互穿透或者部件产生大变形时本身产生穿透,应对可能接触部件表面之间的接触类型以及与接触相关的一些参数进行定义。单面接触用在一个物体表面的自身接触或者它与另一物体表面接触,它允许一个模型的所有表面都可能发生接触,因而无需定义接触面和目标面,常用于求解预先不知道接触表面的自身接触或大变形问题。计算时又有精确快速的优点,因此在整车零部件之间定义此种接触。

根据上述对生存空间的描述,建立其有限元模型。生存空间作为刚体来处理。如图4所示。

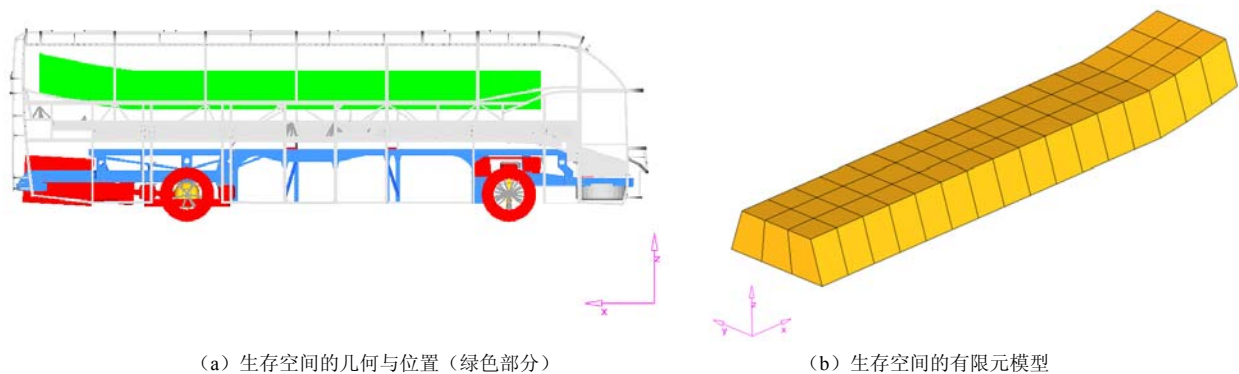


图4 生存空间的几何模型与有限元模型

5 客车侧翻安全性仿真与改进

如图5(a)中所示整车侧翻试验的倾斜台与地沟的几何尺寸和相互位置,建立其对应的有限元模型,如图5(b)。为保证分析结果的精度和计算效率,将倾斜台作为不发生变形的刚性体处理,在车轮和倾斜台之间加入自动面面接触。地沟一般是水泥地面,选择壳单元对路面进行模拟,材料模型为刚性材料,在车身与地沟之间加入自动面面约束。

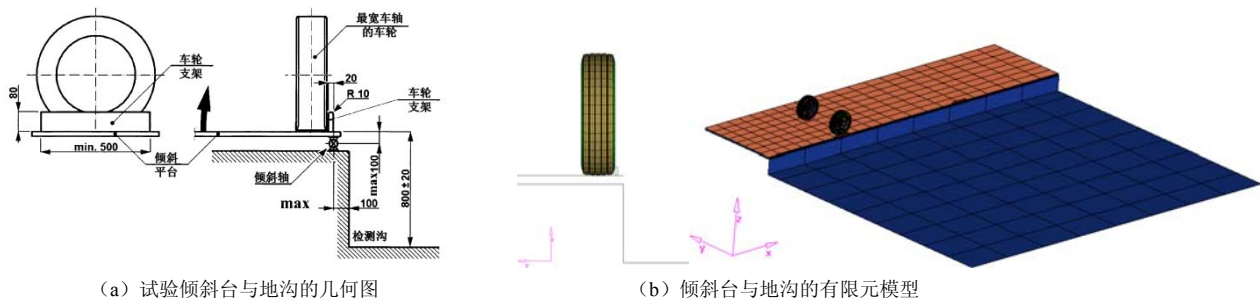


图5 整车侧翻试验的倾斜平台

将整车有限元模型水平放置在倾斜平台上,平台离地面高度 800 mm ,设置档块挡住轮胎。平台侧翻角速度为 0.087 rad/s ,采用国内外广泛采用的LS-DYNA软件仿真计算其侧翻碰撞过程。为了便于结果处理和比较,输出结果从客车侧翻撞地瞬间

到客车侧翻撞地变形不再变化为止, 时间历程 250ms, 整个过程的能量曲线如图 6 所示。可看出: 整个过程总能量保持守恒, 沙漏能可忽略不计。动能从撞地瞬间开始转化为车身的变形能。随着碰撞的继续, 车身变形增大, 变形能随之增大, 动能下降。最终, 车身不再变形, 变形能不再增大。这说明整车模型和分析都是合理、可靠的^[8]。

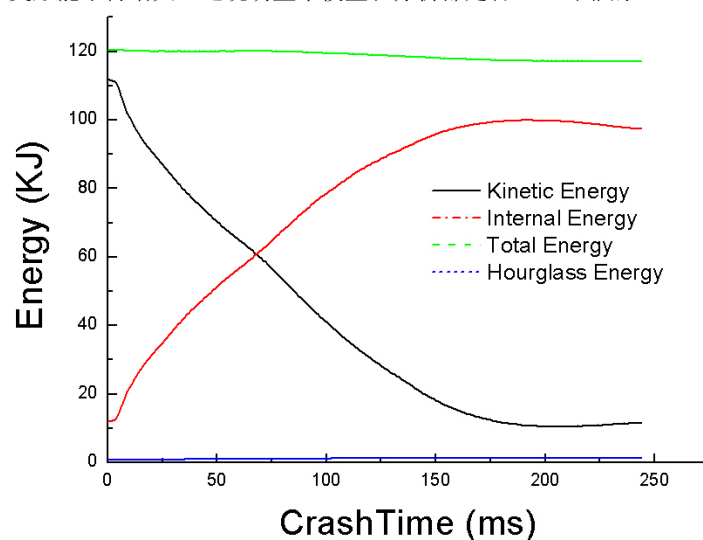


图 6 整车侧翻的能量时间曲线

整车结构变形的仿真结果如图 7 所示。可看出: 客车在侧翻撞地之后, 车身侧围与大顶连接处首先接触地面, 产生极大的冲击力, 导致此处结构产生的应力超过材料的屈服极限而产生塑性变形, 吸收了大部分的冲击动能; 随着碰撞过程的继续, 侧窗立柱发生弯曲, 进而侵入了生存空间; 车身下部及底盘则受力较小, 变形不大。

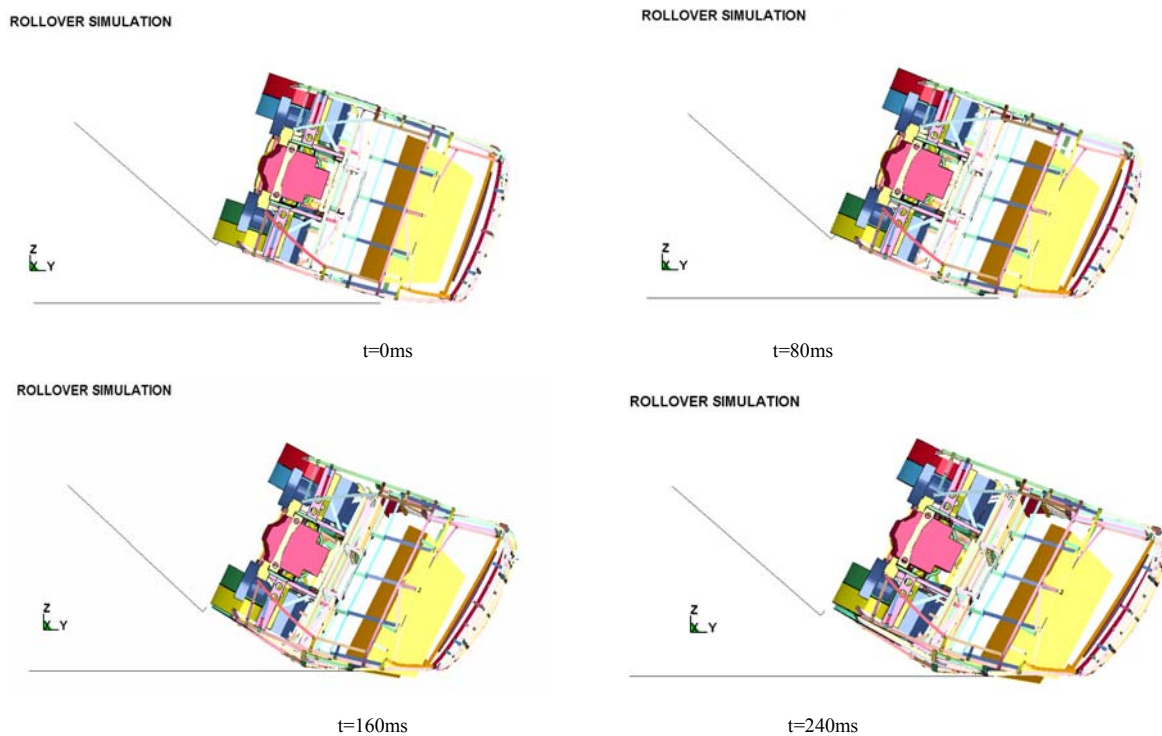
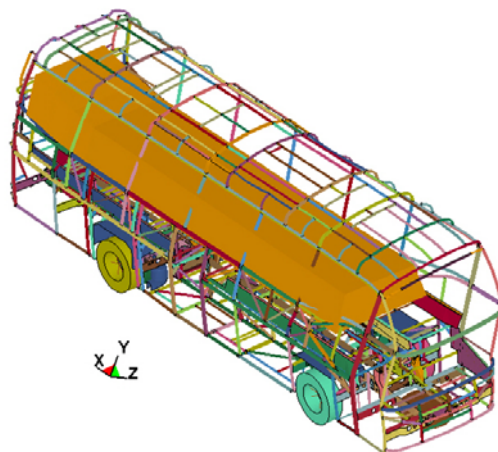


图 7 整车侧翻碰撞变形时序结果

ROLLOVER SIMULATION

图8 客车侧翻碰撞的变形 ($t=160\text{ms}$)

通过仿真结果发现原结构设计在侧翻碰撞安全性方面存在不足：一是车身侧围与大顶连接处强度偏弱，导致车身部件在碰撞中压塌顺利不合理，碰撞能量不能及时通过大顶横梁传递到远离侧翻的一侧（见图8）；二是仓门立柱与腰梁连接处强度偏弱，导致碰撞中侧窗立柱侵入量过大。

为了达到改善整车侧翻碰撞安全性能的目的，通过有限元方法，进行多种方案仿真计算，对原有结构设计做如下改进：①增加侧窗立柱与大顶纵梁连接处的型钢厚度以控制其变形模式，进而达到增强其吸能能力的目的。②在仓门立柱与腰梁连接处增加一加强筋。③去掉侧围上纵梁，将侧窗立柱直接焊接到大顶纵梁上。经过改进，整车重量减少18Kg，重心高度下降接近10mm。

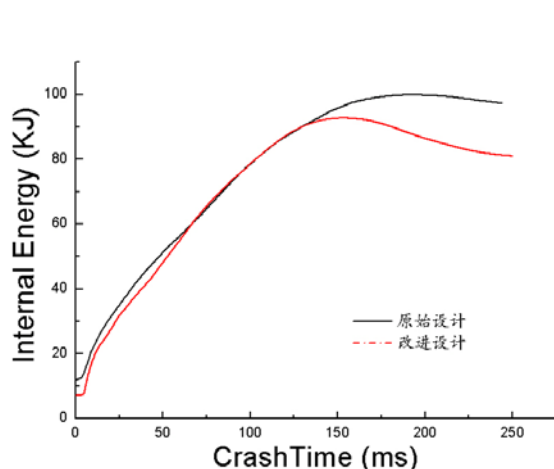
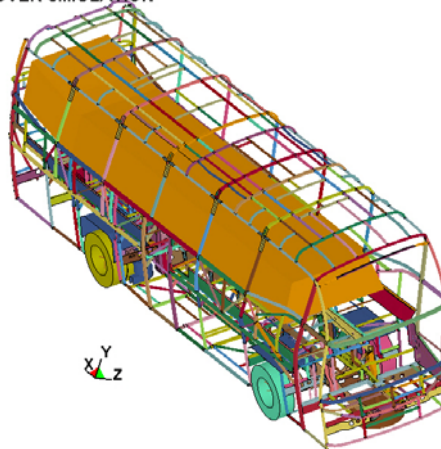


图9 改进设计与原始设计的车身变形能对比

ROLLOVER SIMULATION

图10 改进设计的整车侧翻碰撞变形 ($t=150\text{ms}$)

由图9可见：改进设计与原始设计的车身变形能曲线趋势基本相同，但是改进设计的车身变形能最大值要比原始设计减小较多；而且原始设计的最大变形时刻是160ms，而改进设计的最大变形时刻是150ms，这是由改进设计的车辆重心比原始设计的重心下降了10mm导致的。从图10可见，改进设计的整车侧翻在最大变形时刻，生存空间没有被车身结构侵入，主要原因就是改进设计的车身骨架刚度获得了加强。

6 结语

针对某型号客车建立了其有限元模型，依据欧洲 ECE R66 法规进行了侧翻安全性的仿真研究。仿真分析与理论分析的能量曲线取得了较好的一致，说明本文建立的有限元模型是可靠、准确的。通过侧翻安全性仿真分析，计算了侧翻过程中客车结构的变形，评价了该车的上部结构和生存空间。在此基础上，根据仿真计算结果，对顶横梁、窗立柱等结构进行改进设计，有效提高了其抵抗变形能力，改善了该车的侧翻安全性能。

利用计算机仿真,在设计初期及时发现问题,优化结构,提高客车侧翻碰撞的安全性,减少实车碰撞次数,有利于降低研发成本和缩短设计周期。因此,利用仿真计算技术对于客车设计和开发具有重要的实用价值和指导意义。

参考文献

- [1] 高水德,张绍理,姚常青.国外客车被动安全研究.客车技术与研究,2006,3:7-10
- [2] 周宇,雷正保.客车动态翻滚试验仿真研究.计算机应用,2005,9:37-40.
- [3] Qi Wenguo, Jin Xianlong, Zhang Xiaoyun.(2006). Improvement of Energy-absorbing Structures of a Commercial Vehicle for Crashworthiness using Finite Element Method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp.1001-1009.
- [4] 元文果, 金先龙, 张晓云等.汽车车身碰撞性能的有限元仿真与改进. 上海交通大学学报,2005, 39(9):1452-1456.
- [5] 王欣,丁良旭,唐京玫,等.客车侧翻试验研究[J].客车技术与研究,2008,3:49-51.
- [6] ECE R66 E/ECE/324 Rev.1/Add.65/Rev.1 Uniform Technical Prescriptions Concepting The Approval Of Large Passenger Vehicle With Regard To The Strength Of Their Superstructure.
- [7] 钟志华.汽车耐撞性分析的有限元法[J].汽车工程,1994,16(1):1-6.
- [8] kadir Elitok,Dr. Mehmet A.Guler,Bertan Bayram.(2006). An investigation on the roll-over crashworthiness of an intercity coach, influence of a seat structure and passenger weight. Proc of the 9th international LS-DYNA users conference,Detroit,the United States.